

## INVENTARISATIE FUEL PROCESSING OPTIES VOOR VERVOERSTOEPASSINGEN

J.W. Dijkstra  
J.M. Veenkamp

Revisies		
A	Eindrapport	
B	Revisie t.b.v. publicatie in PDF-format	
Opgesteld door:  J.W. Dijkstra	Goedgekeurd door:  R. Mallant	ECN-Schoon Fossiel
Geverifieerd door:  M. Weeda	Vrijgegeven door:  C.A.M. van der Klein	

## Verantwoording

Deze studie is uitgevoerd in 2000/2001 door de unit Schoon Fossiel, werkeenheid Systeem Aspecten. De studie is gefinancierd als ENGINE project, en is uitgevoerd onder projectnummers 7.2894 en 7.2914.

## Abstract

A literature study has been performed towards options for fuel processing of fossil fuels to produce hydrogen for use in PEMFC propelled vehicles. These options have been categorised towards options for syngas production, syngas conversion and H<sub>2</sub> purification. From the full list of options those only suitable for large scale stationary applications and with a large and/or uncertain research requirements have been eliminated. It is recommended to perform a next phase that gives a more detailed overview of the fuel processing options, and that indicates which fuel processing option is preferred in relation to the starting points.

# INHOUD

SAMENVATTING	5
1 INLEIDING	7
2 LITERATUUR INVENTARISATIE	9
2.1 Bronnen	9
2.2 Resultaten	9
2.2.1 Categorisering	9
2.2.2 Opties voor syngas generatie	9
2.2.3 Opties voor syngas omzetting	12
2.2.4 Opties voor H <sub>2</sub> zuivering	13
2.2.5 Varianten	14
2.2.6 Samenvatting en evaluatie	15
3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	17
REFERENTIES	19
ACRONIEMEN	23
APPENDIX A: BESCHRIJVING VERVOLGTRAJECT	25
APPENDIX B: UITGANGSPUNTEN EN VERGELIJKINGSCRITERIA VOOR GEDETAILEERDE VERGELIJKING	26
APPENDIX C: SPECIFICATIE BRANDSTOFFEN	31
APPENDIX D: CATEGORISERING VAN OPTIES	33



## SAMENVATTING

In dit rapport zijn de resultaten weergegeven van een literatuurstudie naar de verschillende opties voor fuel processing van fossiele brandstoffen voor toepassing in PEMFC aangedreven voertuigen.

In de literatuurstudie zijn de opties voor fuel processing gecategoriseerd naar opties voor respectievelijk syngas productie, syngas omzetting en H<sub>2</sub> zuivering. Binnen deze opties is een grote variëteit aan systeemvarianten gevonden.

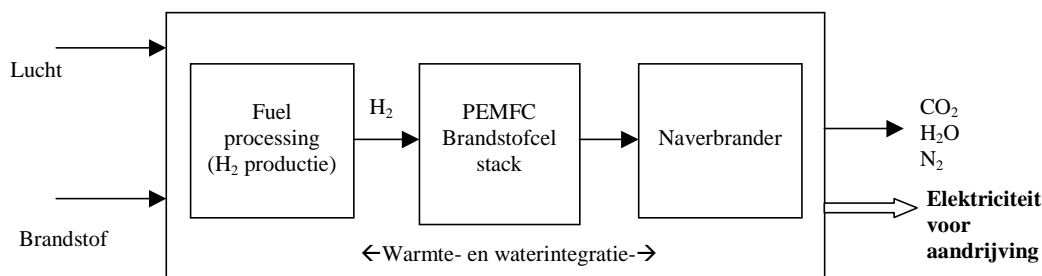
Uit de volledige lijst met opties zijn de technologieën die enkel geschikt zijn voor grootschalige toepassingen en die met een grote en/of onzekere ontwikkelingsinspanning geëlimineerd. De resulterende lijst met opties bevat als opties voor syngas productie: katalytische partiële oxidatie, stoom reforming, autotherme reforming en secundaire reforming. Voor syngas omzetting enkel conventionele shift. Voor waterstofzuivering bevat de lijst selectieve oxidatie, methanisering en waterstofselectieve membranen.

Aanbevolen wordt in een vervolgstudie een overzicht te geven van de kenmerken van de geselecteerde fuel processing opties en aan te geven bij welke randvoorwaarden een optie de voorkeur heeft. Hiertoe zou eerst een kwalitatieve beoordeling van alle geselecteerde opties moeten worden gegeven, gevolgd door een nadere selectie, en vervolgens een kwantitatieve beoordeling van deze nadere selectie. Een voorstel voor de opzet van een vervolgstudie is gegeven in Bijlage A. Als startpunt voor een vervolgstudie zijn in Bijlage B de uitgangspunten voor het ontwerp van een fuel processor voor mobiele toepassing gespecificeerd. Tevens zijn de karakteristieken gedefinieerd op basis waarvan vergelijking plaats vindt van verschillende opties. Waar mogelijk zijn de karakteristieken gekwantificeerd als doelstellingen.



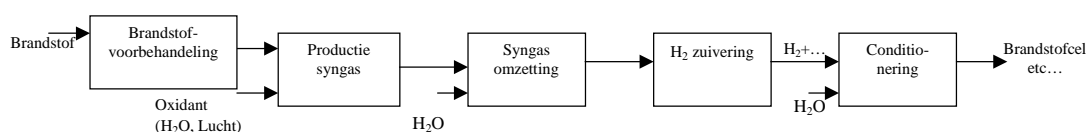
# 1 INLEIDING

Vrijwel alle voertuigen voor vervoer van personen en vracht worden aangedreven door een interne verbrandingsmotor. Gebruik van deze vorm van aandrijving leidt tot emissies van met name  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  en aerosolen. Een mogelijkheid tot het verminderen van deze emissies is de inzet van brandstofcellen. De polymere brandstof cel (PEMFC) wordt in dit verband een grote rol toegedicht. De PEMFC levert de elektriciteit. Deze elektriciteit wordt in een elektromotor gebruikt voor aandrijving van het voertuig. Het probleem dat ontstaat bij gebruik van de PEMFC als krachtbron is dat de vereiste brandstof voor de PEMFC (waterstof) niet aansluit bij de brandstoffen die op dit moment op grote schaal worden toegepast: de logistieke brandstoffen benzine, diesel en LPG. Het meenemen van waterstof onder hoge druk of in vloeibare vorm heeft praktische nadelen. Het is echter ook mogelijk de waterstof aan boord van de auto te synthetiseren uit conventionele brandstoffen (benzine, LPG, diesel), of uit eventuele alternatieven daarvoor, zoals methanol en aardgas (Zie Figuur 1-1).



Figuur 1-1: Schematische weergave brandstofcelsysteem voor aandrijving voertuig

Er bestaan technologieën om de genoemde brandstoffen om te zetten in waterstof (Fuel Processing). Over het algemeen vindt fuel processing plaats in een aantal stappen zoals hieronder schematisch weergegeven in Figuur 1-2.



Figuur 1-2: Schematische weergave fuel processing sectie van een brandstofcelsysteem

In de verschillende deelprocessen vindt achtereenvolgens plaats:

- Brandstof voorbehandeling (ontzwaveling)
- Productie van syngas (een mengsel van  $\text{CO}$  en  $\text{H}_2$ )
- Syngas omzetting (Shiften van het syngas, productie van  $\text{H}_2$  uit  $\text{CO}$  d.m.v. watergasshiftreactie)
- Waterstof zuivering, verwijdering van de laatste resten  $\text{CO}$ .

Voor de verschillende stappen zijn verschillende opties voorhanden. De conversie processen zijn vaak ontwikkeld voor grootschalige en steady state toepassingen. Het op kleine schaal toepassen leidt tot andere eisen, vergt een andere werkwijze en leidt tot andere

stelselconfiguraties. Zo zijn voor vervoerstoepassingen volume, gewicht en korte opstart/opregeltijden van een veel groter belang dan voor grootschalige toepassingen.

Doel van de in dit rapport beschreven studie is een overzicht en beschrijving te geven van de verschillende opties voor fuel processing. Dit is gedaan door middel van een literatuurstudie. Op basis van deze beschrijvingen zijn opties geëlimineerd. Voor de overige opties wordt aanbevolen in een volgende fase een kwalitatieve beoordeling uit te voeren, op basis hiervan een nadere selectie te maken en hierop een kwantitatieve beoordeling uit te voeren. In appendix A is de mogelijke opzet van een deze vervolgstudie gegeven. Appendix B geeft de uitgangspunten, randvoorwaarden, en criteria op basis waarvan de verschillende systemen in deze vervolgstudie vergeleken kunnen worden.



## 2 LITERATUUR INVENTARISATIE

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven van een literatuurinventarisatie naar systemen voor fuel processing. Doel van de studie is een overzicht te geven van de verschillende mogelijkheden binnen fuel processing en hiervan een korte beschrijving te geven. Achtereenvolgens zullen in dit hoofdstuk de geraadpleegde bronnen worden vermeld, en zullen de resultaten van de inventarisatie worden gegeven. Tot slot zal een evaluatie van de resultaten worden gegeven en zullen opties voor nadere beschouwing worden geselecteerd.

### 2.1 Bronnen

De volgende bronnen zijn geraadpleegd voor artikelen op het gebied van fuel processing:

- 6<sup>th</sup> Grove Symposium, Sept. 1999
- Fuel Cell Seminar, Oct. 2000
- Energy database (vanaf 1996, beperkt)
- Online bibliotheek van het Energy Technology Support Unit (ETSU) van het Britse Department of Trade and Industry (DTI)
- Online bibliotheek van het Office of Transport Technologies (OTT) van het Amerikaanse Department of Energy (DOE)
- Interne discussies binnen ECN.

Dit resulteerde in ca. 70 literatuurreferenties.

### 2.2 Resultaten

#### 2.2.1 Categorisering

De aangetroffen opties zijn gecategoriseerd volgens de indeling van Figuur 1-1; er wordt onderscheid gemaakt tussen opties voor:

- Syngas generatie
- Syngas omzetting
- H<sub>2</sub> zuivering.

Technologieën die op een ander niveau van elkaar verschillen en dus niet onder deze fuel processing opties vallen zullen worden aangemerkt als 'varianten'. Hieronder vallen bijvoorbeeld katalysatoren, reactorconcepten, methoden van warmtehuishouding, etc.

#### 2.2.2 Opties voor syngas generatie

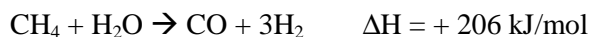
Voor het omzetten van koolwaterstoffen in synthesesgas (syngas generatie) zijn verschillende opties bekend. In de literatuur zijn aangetroffen:

- Stoom reforming (SR)
- Partiële oxidatie (POX) en katalytische partiële oxidatie (CPO)
- Autotherme reforming (ATR)
- Plasma kraken
- Plasma reforming
- Steam iron process
- Thermisch kraken

Deze zullen achtereenvolgens kort worden beschreven. Voor literatuurverwijzingen wordt verwezen naar de tabel in Bijlage D.

### *Stoom reforming*

In de grootschalige chemische industrie vindt de meerderheid van de waterstofproductie plaats met behulp van stoom reforming. Hierbij reageert de koolwaterstof met stoom over een katalysator bij ca 850° C tot een mengsel van koolmonoxide en waterstof (synthesegas). De koolwaterstofvoeding is doorgaans aardgas, wat hier vereenvoudigd voorgesteld wordt door methaan. De hoofdreactie is dan:

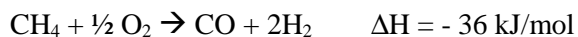


Omdat deze reactie endotherm is, is additionele brandstofinput en een efficiënte warmteoverdracht nodig om warmte uit een andere bron, zoals een brander, naar de processtroom in de reformer over te dragen.

Stoom reforming heeft ten opzichte van de andere methoden het voordeel van de hoogste H<sub>2</sub>/CO verhouding. Nadeel van stoom reforming is dat externe warmtetoevoer noodzakelijk is. Dit laatste leidt tot een relatief groot apparaatvolume. Parallel aan de stoom reforming reactie treedt de watergasshift reactie (zie paragraaf 2.2.3) op.

### *(Katalytische) Partiële Oxidatie (CPO/POX)*

Bij partiële oxidatie (POX) wordt de koolwaterstof bij ca. 1000° C onvolledig geoxideerd tot synthesegas. De hoofdreactie voor methaan is:



Naar verwachting zal dit voor mobiele toepassing katalytisch plaatsvinden, daarom zal hier verder worden gesproken over Catalytic Partial Oxidation (CPO). De waterstof opbrengst is bij CPO lager dan bij stoom reforming. De temperatuur is doorgaans lager dan bij POX. De partiële oxidatiereactie is exotherm, terwijl er in de mobiele systemen geen toepassing bestaat voor de geproduceerde warmte. Echter, daar waar gesproken wordt over CPO wordt dikwijls ook stoom toegevoegd aan de voeding, zodat de warmte van de exotherme reactie wordt benut voor de endotherme stoom reforming reactie die tegelijkertijd optreedt. CPO gaat hiermee richting autotherme reforming. Redenen voor toevoegen van de stoom zijn het voorkomen van koolstofdepositie op de katalysator en voor het beheersen van de temperatuur.

Het nadeel van partiële oxidatie is de lagere H<sub>2</sub>/CO verhouding t.o.v. stoom reforming. Een voordeel is dat bij CPO geen externe warmtebron benodigd is, wat leidt tot een simpeler reactor, en naar verwachting snellere opstarttijden.

### *Autotherme reforming*

Op kleine schaal is autotherme reforming (ATR) doorgaans een aantrekkelijk alternatief voor stoom reforming. Hierbij reageert de koolwaterstof met zuurstof (in casu lucht) en stoom om waterstof te produceren. Gebruikelijk is dat de brandstof eerst partieel wordt geoxideerd en dat de vrijkomende warmte wordt gebruikt in een aangrenzende sectie waar stoom reforming plaats vindt. De warmtehuishouding wordt beheerst door het aanpassen van de verhoudingen brandstof, lucht en stoom in de voeding. Bij een juiste verhouding is geen externe warmtebron nodig. De H<sub>2</sub>/CO verhouding ligt tussen die van (katalytische) partiële oxidatie en stoom reforming in.

### *Secondary/combined reforming*

Secondary reforming en combined reforming zijn combinaties van stoom reforming en ATR. Exact definiëren wat deze technologieën inhouden is niet eenvoudig omdat de verschillende reformer fabrikanten niet geheel eenduidig zijn in hun terminologie. Secondary reforming is een

autotherme reforming stap die plaatsvindt na de primaire stoom reforming stap. Van combined reforming wordt gesproken indien de primaire reforming stap en de secundaire reforming stap in een enkele reactor zijn geïntegreerd.

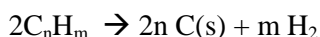
De autotherme reforming wordt op industriële schaal uitgevoerd met zuurstof of met lucht. ATR met zuurstof vindt plaats in gevallen waarin stikstof niet gewenst is in het synthesesgas, bijvoorbeeld bij de methanol productie. ATR met lucht vindt plaats wanneer de aanwezigheid van stikstof geen bezwaar is, of juist gewenst is, zoals bij de ammoniak productie. Door het combineren van stoom reforming met ATR kan een specifieke syngas samenstelling worden bewerkstelligd die gunstig is voor de methanol synthese danwel de ammoniak synthese.

Hiernaast heeft de combinatie van reforming stappen nog enkele andere voordelen. De stoom reformer kan 75% kleiner worden uitgevoerd, kan op een lagere temperatuur opereren en kan om deze reden op een hogere druk worden bedreven dan een stoom reformer in een conventioneel stoom reforming proces.

Voor vervoerstoepassingen wordt gestreeft naar een maximale H<sub>2</sub> opbrengst en is het sturen van de H<sub>2</sub>/CO danwel H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> verhouding niet relevant en zal lucht het oxidatiemedium zijn. Er zal een afweging moeten worden gemaakt tussen de kleinere afmetingen, lagere werkt temperatuur en de hogere complexiteit van deze combinaties.

### *Plasma kraken*

Bij plasma kraken worden koolwaterstoffen gekraakt onder pyrolyse condities. De reactie is als volgt:



De vereiste hoge temperatuur wordt verkregen in een plasmagenerator. Hierin wordt elektrische energie omgezet in thermische energie. Bijna alle koolstof wordt omgezet in carbon black en de geproduceerde waterstof heeft een zuiverheid van meer dan 97%. De geproduceerde koolstof en waterstof worden afgekoeld in diverse warmtewisselaars en tenslotte gescheiden. Voordeel van het proces is o.a. de grote flexibiliteit ten aanzien van de brandstof. Nadeel is het gebruik van elektriciteit. De vorming van carbon black is niet wenselijk is voor mobiele toepassingen.

### *Plasma reforming*

Bij plasma reforming worden koolwaterstoffen samen met stoom en lucht bij hoge temperatuur (>2000°C) gedissocieerd en geïoniseerd met of zonder katalysator. Vervolgens wordt het gasmengsel snel afgekoeld, waarbij een gasmengsel van H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub> ontstaat. Het ruwe gas wordt verder afgekoeld met warmte terugwinning. De vereiste hoge temperatuur wordt verkregen in een plasmagenerator. Hierin wordt elektrische energie omgezet in thermische energie. Voordelen van het proces zijn o.a. grote flexibiliteit ten aanzien van de brandstof en het feit dat het proces kan worden uitgevoerd in een compacte, relatief goedkope reactor met snelle responstijd (minder dan een seconde). Daardoor leent het proces zich voor kleinschalige waterstofproductie, ook aan boord van een voertuig. Nadeel is het gebruik van elektriciteit.

### *Steam Iron Process*

Het Steam Iron proces is een van de oudste methoden om waterstof te produceren. Het is een cyclisch proces voor het splitsen van water. Kolen of biomassa worden vergast tot een arm reducerend gas dat koolmonoxide en waterstof bevat. Dit gas reageert met ijzeroxides om een gereduceerde vorm van ijzer te produceren. Het gereduceerde ijzer wordt opnieuw geoxideerd met stoom onder vorming van waterstof. De elektrische efficiëntie van een systeem waarin deze waterstof vervolgens wordt ingezet in een SOFC is ongeveer 25% [27]. Vanwege de aard van de grondstoffen en de complexiteit is het proces ongeschikt voor mobiele toepassingen.

### *Thermisch kraken*

Het thermisch kraken van aardgas is een commercieel proces voor het produceren van carbon black. De reactie voor methaan is:



Het carbon black wordt o.a. gebruikt voor het vulkaniseren van rubber en voor het produceren van drukinkten. In industriële processen wordt het bijproduct waterstof gebruikt om te voorzien in een deel van de warmtevraag van het proces. Nadeel van dit proces is de lage efficiency (de energie-efficiency is ongeveer 60% op LHV basis). Voor mobiele toepassing is het proces niet geschikt gezien de productie van koolstof als vast bijproduct.

### *Algemeen*

In Bijlage D is een inventarisatie gemaakt van de in de literatuur aangetroffen fuel processing opties. In de literatuur zijn geen vaste combinaties van brandstof en fuel processing stappen gevonden. Voor andere brandstoffen, LPG, benzine, diesel, etc., worden zowel stoom reforming, autotherme reforming en CPO ontwikkeld.

De ontwikkelingen in de fuel processing vinden hoofdzakelijk plaats op het gebied van nadere ontwikkeling van bekende opties en in veel mindere mate op het gebied van nieuwe opties. Veel literatuur beschrijft de ontwikkeling van specifieke reactortypen, katalysatoren of beschrijft geïntegreerde systemen.

### 2.2.3 Opties voor syngas omzetting

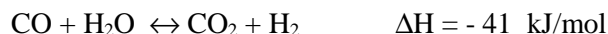
De in de literatuur en in discussies geopperde opties voor syngas omzetting zijn:

- Conventionele shift
- Ultra deep shift

Deze zullen achtereenvolgens kort worden beschreven. Ook zal worden ingegaan op de integratie van shift met membraanscheiding.

### *Conventionele shift*

De in het syngas aanwezige CO wordt omgezet in waterstof m.b.v. de watergas shift reactie:



Hiertoe wordt indien nodig water (stoom) aan de synthesesgasstroom toegevoegd. Doorgaans wordt de shift in twee stappen met tussenkoeling uitgevoerd (hoge temperatuurshift HTS en lage temperatuurshift LTS). Een mogelijk alternatief is een shift bij een tussenliggende temperatuur (middentemperatuurshift MTS). De conversie wordt bepaald door de ligging van het chemisch evenwicht dat verschuift naar waterstof bij lagere temperaturen.

### *Ultra-deep shift*

Een in dit kader van dit project bij ECN geopperde methode voor synthesesgas omzetting is de ultra-deep shift. In literatuur is geen melding gevonden van werk hieraan. Bij de ultra-deep shift wordt er zo ver geshift dat het CO-gehalte daalt tot beneden het niveau dat voor de PEMFC schadelijk is. Dit wordt bereikt door de shift bij lage temperatuur uit te voeren. De voordelen van een ultra-deep shift zijn systeemvereenvoudiging door weglaten van de CO-verwijdering en een hoger rendement. Bij ultra deep shift wordt extra waterstof geproduceerd, terwijl weggegeren van waterstof, zoals bij het alternatief selectieve oxidatie geschiedt, voorkomen wordt. De nadelen van een ultra-deep shift zijn een hoger reactorvolume vanwege de relatief

lage reactiesnelheid bij lage temperaturen. Het is onzeker of een geschikte katalysator met voldoende activiteit bij de benodigde lage temperatuur ontwikkeld kan worden. Er is een grote markt voor shift-katalysatoren (op industriële schaal) en er is aan deze katalysatoren reeds veel onderzoek gedaan.

#### Membraan shift reactor

Een mogelijk concept is de integratie van keramische membranen en een shiftreactor (Wihys concept). Hierbij vindt parallel aan de shift reactie over een katalysator H<sub>2</sub> verwijdering door de keramische membranen plaats, waardoor verschuiving van het evenwicht richting waterstof plaats vindt. Nadeel is o.a. de vereiste drukval over het membraan. Het geproduceerde waterstof is niet zuiver genoeg om zonder verdere zuivering aan de huidige PEMFC's toe te voeren.

#### 2.2.4 Opties voor H<sub>2</sub> zuivering

De volgende opties voor H<sub>2</sub>-zuivering zijn aangetroffen:

- alternatieven voor de CO-verwijdering:
  - selectieve oxidatie van CO
  - methanisering van CO
- pressure swing adsorption (PSA)
- membranen
  - palladium membranen
  - keramische membranen
  - polymere membranen

Deze zullen achtereenvolgens kort worden beschreven.

#### *Selectieve oxidatie*

Selectieve oxidatie (of preferentiële oxidatie, SELOX, PROX) is op dit ogenblik een veelgebruikte methode om het CO gehalte in het reformaat te verlagen. Het is gebaseerd op de snelle katalytische oxidatie van CO ten opzichte van waterstof, zodat de hoeveelheid geoxideerde waterstof beperkt blijft:



Het proces is operationeel in de ammoniakproductie en de benodigde katalysatoren zijn beschikbaar. De katalysatoren moeten echter geschikt gemaakt worden om te werken onder de condities van PEMFC systemen. De warmtehuishouding in de reactor verdient speciale aandacht, dit om de zeer exotherme reactie in de hand te houden. De aanwezigheid van een grote hoeveelheid CO<sub>2</sub> in het reformaat kan, als de procescondities niet strikt in de hand worden gehouden, resulteren in de productie van CO via de reverse shift reactie.

#### *Methanisering*

Bij methanisering wordt het CO omgezet naar methaan:



Dit heeft als voordeel ten opzichte van selectieve oxidatie dat het methaan nog nuttig kan worden gebruikt in de naverbrander, als nadeel een kleine afname van de hoeveelheid waterstof. De verwachte rendementswinst is echter beperkt. Een geschikte katalysator is voor grootschalige toepassingen beschikbaar. De warmtehuishouding in de reactor verdient speciale aandacht, dit om de zeer exotherme methaniseringsreactie in de hand te houden. Doorgaans wordt voorafgaand aan methanisering CO<sub>2</sub> verwijderd uit het procesgas. De reden is dat

aanwezigheid van CO<sub>2</sub> kan leiden tot extra verlaging van de hoeveelheid waterstof door het optreden van de reverse shift reactie of door reactie van waterstof met CO<sub>2</sub> tot CH<sub>4</sub>.

### *H<sub>2</sub>-zuivering door middel van pressure swing adsorption (PSA)*

Bij pressure swing adsorption (PSA) vindt zuivering van waterstof plaats door afwisselende adsorptie en desorptie van de niet gewenste componenten aan een vast adsorbens. PSA is een volwassen technologie die op industriële schaal veel wordt toegepast. Voor mobiele toepassingen is het minder geschikt door het grote benodigde volume.

### *Membranen*

#### Palladium membranen

Waterstof is met behulp van een palladium membraan is af te scheiden omdat het membraan laat alleen waterstof door laat. Hierdoor is verder zuivering niet nodig en is een zeer hoge utilisatie van de waterstof in de PEM mogelijk. Nadelen zijn de hoge prijs van het membraan, het rendement van ongeveer 90% (10% verlaat onafgescheiden het membraan in het retentaat samen met het CO<sub>2</sub> en CO), de hoge temperatuur waarbij de scheiding moet worden bedreven, en het vereiste drukverschil over het membraan.

#### Keramische membranen

Met keramische membranen kan geen scheiding worden bereikt die voldoet voor de huidige PEMFC. Het CO gehalte kan niet voldoende worden gereduceerd. In geval van ontwikkeling van PEMFC's met hogere CO resistentie is gebruik van keramische membranen mogelijk. Combinatie met Selox of methanisering is mogelijk om de laatste resten CO te verwijderen. Het voordeel van is in dat geval wel dat de stroom geconcentreerder is omdat het bijna nog maar weinig CO<sub>2</sub> bevat. In paragraaf 2.2.3 wordt verder ingegaan op de mogelijkheid tot integratie met een shift reactor.

#### Polymere membranen

Met polymere membranen kan evenals met keramische membranen geen scheiding worden bereikt die voldoet voor de huidige PEMFC. Het CO gehalte kan niet voldoende worden gereduceerd. Combinatie met Selox of methanisering is mogelijk om de laatste resten CO te verwijderen. Het voordeel van is in dat geval wel dat de stroom geconcentreerder is omdat het bijna nog maar weinig CO<sub>2</sub> bevat. Polymere membranen hebben als voordeel dat ze goedkoop en licht zijn.

## 2.2.5 Varianten

Als varianten zijn geïdentificeerd:

- verschillende katalysatoren / reactoren voor reforming, water-gas shift en selectieve oxidatie, bijvoorbeeld reactoren op basis van:
  - monoliet
  - microchannel (ook voor efficiënte warmtewisselaars)
  - schuimen
  - geïntegreerde systemen van gebruikelijke opties, binnen één apparaat (de artikelen vermelden meestal *dat* een geïntegreerd systeem is gebouwd / gemodelleerd, maar vermelden niet *hoe* dit is gedaan)
- methoden voor zwavelverwijdering
- brandstofcel / stackontwikkelingen die invloed hebben op het systeem:

- hogere CO tolerantie van de brandstofcel
- bedrijf van de stack op hogere temperatuur (tot 120°C)
- self-humidifying stacks of cellen
- cellen die niet bevochtigd hoeven worden
- versimpeling van het fuel processing systeem: geïntegreerde fuel processing systeem
  - compacte reformer (voor methanol)
  - membraan reformer in combinatie met ejectors voor recycelen brandstof
  - vele methoden van watermanagement voor de PEMFC

Op de verschillende katalysatordragers en reactortypen zal verder worden ingegaan.

### *Katalysatoren / reactoren*

In de fuel processing vinden verschillende katalytische reacties plaats. Dit is voor de reforming, de water-gas shift reactie en de selectieve oxidatie dan wel de methanisering van CO. De vereiste reactor volumes zijn aanzienlijk en leiden tot een hoog specifiek gewicht en volume voor de fuel processor. Dit kan aanzienlijk worden verkleind door het gebruik van innovatieve reactorconcepten. Zo kan met gestructureerde katalysatoren het benodigd volume sterk worden verkleind.

Een optie voor de ontwikkeling van compacte fuel processoren is de toepassing van microchannel structuren. Door de kleine diameter van de kanalen (orde grootte 30 µm) is de diffusielengte klein waardoor diffusiegelimeerde reacties worden versneld. Deze technologie heeft dus enkel voordeel bij snelle reacties (b.v. shiftreactie >400° C of bij lagere temperaturen i.g.v. nieuwe katalysatoren). De technologie geeft snellere massa- en warmteoverdracht en heeft hogere doorzetten dan gerealiseerd kunnen worden met conventionele gepakte bedden. Dit heeft potentieel voor het sterk reduceren van het gewicht en volume van fuel processors. Combinatie van warmtewisseling en reactie maakt compactere stoom reformers mogelijk. Bovendien kan betere warmte-integratie en hogere energie efficiëntie van het hele systeem worden bereikt. Nadeel is wel de hogere drukval. [69].

Onderzoekers van het Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) in de Verenigde Staten ontwikkelen op dit moment microchannel warmtewisselaars, reactoren en scheidingsystemen als componenten voor compacte waterstof generatoren voor brandstofcellen. Dit werk, gesponsord door het Office of Transport Technologies (OTT) van het DOE, demonstreert nu hoge prestaties in kleine eenheden. Het afgelopen jaar heeft het PNNL zich geconcentreerd op de demonstratie van een microchannel stoom reformer systeem bestaande uit vier microchannel stoom reformers en meer dan vierentwintig microchannel warmtewisselaars. Hoewel de focus tot op dit moment is gelegd op stoom reforming, gaan de principes en voordelen ook op voor andere fuel reforming opties en voor andere toepassingen.

### 2.2.6 Samenvatting en evaluatie

Tabel 2-1 geeft een overzicht van de gevonden opties. Aangegeven is aan welke technologieën in ECN projecten zijn of worden gebruikt (Aangegeven met vetgedrukte letters). Dit is gedaan op basis van gesprekken met ECN kennisdragers en technologieontwikkelaars. Op basis van de bovenstaande beschrijvingen zijn de zijn de volgende technologieën niet interessant bevonden voor verdere evaluatie:

- Technologieën enkel interessant voor grootschalige toepassingen (endotherm kraken, plasma kraken, pressure swing adsorption)
- Technologieën met een grote en/of onzekere onderzoeksinspanning (ultra low temperature shift, plasma reforming).

De technologieën die in aanmerking komen voor verdere evaluatie zijn aangegeven in de tabel met een asterix (\*).

Tabel 2-1 : *Overzicht fuel processing opties*

Productie syngas	Syngas omzetting	H <sub>2</sub> zuivering
* <b>(Katalytische) partiële oxidatie</b>	* <b>Conventionele shift</b>	* <b>Selectieve oxidatie (Selox)</b>
* <b>Stoom reforming</b>	Ultra low temperature shift	* Methanisering
* <b>Autotherme reforming</b>	* <b>Shift membraan reactor</b>	* H <sub>2</sub> selectieve membranen
* Secondary/combined reforming		
Plasma kraken		<b>Palladium</b>
* Plasma reforming		<b>Keramisch</b>
Steam/Iron process		Polymeer
Thermisch kraken		Pressure Swing Adsorption

**Vetgedrukt** = wordt/is door ECN aan gewerkt

\*) komt in aanmerking voor verdere evaluatie

Aanbevolen wordt in een vervolgstudie de geselecteerde opties nader te evalueren. De vervolgstudie moet een overzicht geven van de eigenschappen van de verschillende opties voor fuel processing, en zal aan moeten geven bij welke randvoorwaarden een bepaald processchema de voorkeur heeft. Deze evaluatie zijn de volgende stappen voorzien.

1. Het op kwalitatieve wijze beoordelen van de voor- en nadelen van opties in een tabel aan de hand van geselecteerde criteria, gerelateerd aan het beoogde toepassingsgebied.
2. Het vaststellen van de uitgangspunten voor een kwantitatieve evaluatie (Basis of design).
3. Het uitvoeren van gedetailleerde kwantitatieve evaluatie, gerelateerd aan de beoogde toepassing.

Een uitgebreide opzet van de vervolgstudie is gegeven in Bijlage A.

Als startpunt voor de vervolgstudie wordt in Bijlage B en C inventarisatie gemaakt van uitgangspunten en vergelijkingscriteria.



### 3 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

- Ontwikkelingen op het gebied van fuel processing vinden voornamelijk plaats op het vlak van het verder ontwikkelen van een beperkt aantal conventionele opties. Uit de literatuur komt geen duidelijk beeld naar voren over de welke optie onder welke randvoorwaarden de meest aantrekkelijke is.
- Een overzicht van recente literatuur over fuel processing opties is gemaakt waarbij onderscheid is gemaakt tussen opties voor:
  - Syngas productie
  - Syngas omzetting
  - H<sub>2</sub> zuivering.
- Tabel 3-1 geeft een overzicht van de in de literatuur aangetroffen fuel processing opties. In de tabel is aangegeven welke technologieën in ECN projecten zijn toegepast of nu worden toegepast (vetgedrukt aangegeven). Op basis van de gemaakte beschrijvingen is een eerste selectie gemaakt van technologieën die in aanmerking komen voor nadere beschouwing (Aangegeven met een \*).

Tabel 3-1: *Overzicht fuel processing opties*

Productie syngas	Syngas omzetting	H <sub>2</sub> zuivering
* <b>(Katalytische) partiële oxidatie</b>	* <b>Conventionele shift</b>	* <b>Selectieve oxidatie (Selox)</b>
* <b>Stoom reforming</b>	Ultra low temperature shift	* Methanisering
* <b>Autotherme reforming</b>	* <b>Shift membraan reactor</b>	* H <sub>2</sub> selectieve membranen
* Secondary/combined reforming		
Plasma kraken		<b>Palladium</b>
* Plasma reforming		<b>Keramisch</b>
Steam/Iron process		Polymeer
Thermisch kraken		Pressure Swing Adsorption

**Vetgedrukt** = wordt/is door ECN aan gewerkt

\*) komt in aanmerking voor verdere evaluatie

- Aanbevolen wordt in een vervolgstudie de geselecteerde opties nader te evalueren. De vervolgstudie zal tot doel hebben een overzicht te geven van de kenmerken van fuel processing opties. De studie zal aangeven onder welke randvoorwaarden een bepaald processchema de voorkeur heeft. De beschrijving van een voorstel voor een vervolgtraject is gegeven in Appendix A.



## REFERENTIES

- [1] Rolls-Royce and Associates Limited, *Solid Polymer Fuel Cell Systems Applications study to identify and prioritise R&D issues*, ETSU Report Number - ETSU/FCR/005, 1993
- [2] Ioannides, T., Neophytides, S., *Efficiency of a solid polymer fuel cell operating on ethanol*, J. Power Sources 91 (2000) 150-156
- [3] Ioannides, T., et.al., *Thermodynamic analysis of ethanol processors for fuel cell applications*, J. Power Sources 92 (2001) 17-25
- [4] Thorstensen, B., et.al., *A parametric study of fuel cell system efficiency under full and part load operation*, J. Power Sources 92 (2001) 9-16
- [5] ADL, *Cost analysis of fuel cell system for transportation, Baseline system cost estimate*, Task 1 and 2 final report to: Department of Energy, March 2000
- [6] Davis, P.B., et.al., *Challenges for transportation fuel cells: fuel processing and cost*, 2000 Fuel Cell Seminar, October 2000
- [7] Milliken, J., et.al., *Department of Energy Transportation Fuel Cell Program*, Presentation at the annual national laboratory R&D meeting of the DOE fuel cells for transportation program, June 2000
- [8] Krumpelt, M., et.al., *Catalytic Autothermal Reforming*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [9] Ahmed, S., et.al., *Integrated Fuel Processor Development*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [10] Myers, D., et.al., *Alternative water-gas shift catalysts*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [11] Kopasz, J.P., et.al., *Effects of fuels/contaminants on reforming catalyst performance and durability*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [12] Borup, R., et.al., *Fuel processing: fuel and fuel constituents effects on fuel processor and catalyst durability and performance*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [13] Krause, T., et.al., *Sulfur removal from reformat*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [14] Inbody, M., et.al., *CO Clean-up development*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [15] PNNL, *Microchannel fuel processing*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [16] Doss, E., et.al., *Transportation fuel cell systems, modeling and analysis*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [17] Zawodzinski, T., et.al., *R&D on optimized cell performance for operation on reformat and air*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [18] Zawodzinski, C., et.al., *Efficient fuel cell systems*, Presentation at the DOE National Laboratory R&D Meeting, June 2000
- [19] Meyer, A.P., et.al., *Fuel cell systems development for automobiles and commercial vehicles*, IFC, 2000
- [20] Meyer, A.P., et.al., *Progress in the development of PEM fuel cell engines for transportation*, Society of automotive engineers, inc., 2000
- [21] Gorman, M.E., et.al., *50-kilowatt ambient pressure automotive pem fuel cell and direct methanol fuel cell development*, IFC, 1997

- [22] Chalk, S.G., et.al., *Challenges for fuel cells in transport applications*, J. Power Sources 86 (2000) 40-51
- [23] Sattler, G., et.al., *Fuel cells going on-board*, J. Power Sources 86 (2000) 61-67
- [24] Dudfield, C.D., et.al., *A compact CO selective oxidation reactor for solid polymer fuel cell powered vehicle application*, J. Power Sources 86 (2000) 214-222
- [25] Han, J., et.al., *Purifier-integrated methanol reformer for fuel cell vehicles*, J. Power Sources 86 (2000) 223-227
- [26] Cunha, J., et.al., *Modelling the integration of a compact plate steam reformer in a fuel cell system*, J. Power Sources 86 (2000) 515-522
- [27] Hacker, V., et.al., *Hydrogen production by steam-iron process*, J. Power Sources 86 (2000) 531-535
- [28] Rampe, T., et.al., *Hydrogen generation from biogenic and fossil fuels by autothermal reforming*, J. Power Sources 86 (2000) 536-541
- [29] CJB Developments Ltd, *Feasibility of using gasoline type fuels in mobile spfc systems*, ETSU F/02/00097/rep
- [30] Menzer, R., B. Höhle, *Verfahrensanalyse von Brennstoffzellensystemen zur Stromerzeugung für Elektroantriebe in Fahrzeugen bei Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffe*, Forschungszentrum Jülich, Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik, Jül-3666,
- [31] Menzer, R., B. Höhle, *Analyse von Energieumwandlungssystemen für Fahrzeuge mit Brennstoffzellen: Methanol und Benzin als Energieträger*, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energieverfahrenstechnik, Jül-3537,
- [32] Stoffele, R., *Evaluatie van een kleinschalig fuel processing systeem*, afstudeerverslag Hogeschool Enschede, 2000
- [33] Recupero, V., et.al., *Development of a compact clean-up reactor based on the selective oxidation of CO*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 71-74
- [34] Adjemian, K.T., et.al., *Composite membranes for high temperature operation of proton-exchange membrane fuel cells*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 164-166
- [35] Dubose, R., et.al., *Improve fuel cell thermal efficiency with desiccant humidifiers*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 209-211
- [36] Wiartalla, A., et.al., *Compressor expander units for fuel cell systems*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 212-215
- [37] An, S., et.al., *Comparison and development of Pt-membranes reformed by two kinds of methods for self-humidifying PEM fuel cell*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 216-219
- [38] Heinzl, A., et.al., *Reforming of fossil fuels - R&D at Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 256-259
- [39] Cross, J., et.al., *Fuel Cell Power System Technology*, Fuel Cell Systems 2000, pp 260-262
- [40] Inbody, M., et.al., *Los Alamos Fuel Cell Research: Focus on PEMFC fuel composition effects, transient CO control and stack testing*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 263-264
- [41] Schmal, D., et.al., *Polymer fuel cell system design for all electric naval ships*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 268-271
- [42] Kumar, R., et.al., *Performance requirements for a gasoline-fueled automotive fuel cell system to meet the PNGV target of 80 miles per gallon*, Fuel Cell Seminar 2000, 272-275
- [43] Amphlett, J., et.al., *PEM fuel cell hydrogen production by methanol-steam reforming: the effect of catalyst deactivation*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 276-279
- [44] Myers, D., et.al., *Reducing the volume/weight of the fuel post processor for PEFC power systems*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 280-283
- [45] Kopasz, D., et.al., *Effects of gasoline components on fuel processing and implications for fuel cell fuels*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 284-287

- [46] Borup, R., et.al., *Fuels and fuel impurity effects and fuel processing catalysts*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 288-291
- [47] McDermott, S., et.al., *Results of fuel processor lifetime testing*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 296-297
- [48] Swartz, S., et.al., *Nanoscale water-gas-shift catalysts*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 298-301
- [49] Palm, C., et.al., *Catalysts for diesel reforming*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 302-304
- [50] Peters R., et.al., *Kinetics of methane steam reforming*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 305-308
- [51] Wieland, S., et.al., *New catalysts for autothermal reforming of gasoline and water gas shift reaction*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 309-312
- [52] Roes, J., et.al., *Cracking of hydrocarbons to produce hydrogen for PEM fuel cells*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 317-320
- [53] Okada, O., et.al., *Development of advanced reforming system for PEFC*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 321-324
- [54] Lindstrom, B., et.al., *Steam reforming of methanol for automotive applications*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 325-328
- [55] Bloomfield, D., et.al., *Hydrocarbon fuel processing for fuel cell power plants*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 329-332
- [56] Hacker, V., et.al., *The steam-iron process for gas reforming and hydrogen generation*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 333-335
- [57] Chen, E., et.al., *Simulating the performance of a selective oxidation reactor for carbon monoxide removal*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 340-343
- [58] He, L., et.al., *Performance influence of catalyst supports in a transportation fuel processor*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 388-390
- [59] Nakagawa, T., et.al., *Development of PEFC in Fuji Electric*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 391-394
- [60] Maeda, H., et.al., *Development of 10 kW class PEFC module*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 397-400
- [61] Tourbier, D., et.al., *Automotive PEM fuel cell system development at Honeywell*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 405-408
- [62] Take, T., et.al., *Cu-Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al-plate catalyst for a methanol reformer*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 413-416
- [63] Dams, R., et.al., *Compact, fast response methanol fuel processing systems for PEMFC electric vehicles*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 526-529
- [64] Mauzey, J., et.al., *Automotive fuel processor*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 534-537
- [65] Docter, A., et.al., *Reformer for gasoline and gasoline like fuels*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 538-541
- [66] Krumpelt, M., et.al., *Catalytic autothermal reforming for fuel cell systems*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 542-545
- [67] Cooper, J., et.al., *Direct electrochemical conversion of carbon: systems for efficient conversion of fossil fuels to electricity*, Fuel Cell Seminar 2000, pp 716-718
- [68] Amphlett, J.C., et.al., *Simulation of a 250 kW diesel fuel processor/PEM fuel cell system*, Fifth Grove Fuel Cell Symposium, Commonwealth Institute, London, UK, 22-25 Sept. 1997, J. of Power Sources 71, 1998, 179-184
- [69] Wegeng, R.S., L.R. Pederson, W.E. TeGrotenhuis, G.A. Whyatt, *Compact fuel processors for fuel cell powered automobiles based on microchannel technology*, Fuel Cells Bulletin 28, Januari 2001
- [70] IEA, AFIS december 1996, p. 109
- [71] Reid, R.C. et.al, *The properties of gases and liquids*, 4th ed., McGraw Hill, 1988

- [72] Wyman, C.E., et.al., *Ethanol and methanol from cellulosic biomass*, *Renewable Energy*, Sources for Fuels and Electricity, Island Press, Washington D.C., 1993
- [73] Gasunie, *Physical properties of natural gases*, N.V. Nederlandse Gasunie, 1988

**Websites:**

- [74] Online-bibliotheek van het Office of Transport Technologies van het Amerikaanse Department of Energy [www.ott.doe.gov/oaat/library.html](http://www.ott.doe.gov/oaat/library.html)
- [75] Online-bibliotheek van het Energy Technology Support Unit van het Britse Department of Trade and Industry [www.dti.gov.uk/renewable/cgi-bin/show.pl](http://www.dti.gov.uk/renewable/cgi-bin/show.pl)
- [76] Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Annual Review [www.eren.doe.gov/hydrogen/docs/28890toc.html](http://www.eren.doe.gov/hydrogen/docs/28890toc.html)
- [77] Argonne Technology Transfer Links [www.techtransfer.anl.gov/links.html](http://www.techtransfer.anl.gov/links.html)
- [78] Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Annual Review [www.eren.doe.gov/hydrogen/docs/28890toc.html](http://www.eren.doe.gov/hydrogen/docs/28890toc.html)
- [79] Journal of Power Sources [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) via ECN pagina
- [80] Xcellsis, *fuel cell engine company* [www.xcellsis.com](http://www.xcellsis.com)
- [81] Hyweb [www.hydrogen.org](http://www.hydrogen.org)
- [82] US Fuel Cell Council [www.usfcc.com/internet.htm](http://www.usfcc.com/internet.htm)

## ACRONIEMEN

AC	Alternating Current
ATR	Autotherme reforming
Benz	Benzine
BOP	Balance of Plant
CH <sub>4</sub>	Methaan
CO	Koolmonoxide
CO <sub>2</sub>	Kooldioxide
CPO	Katalytische (catalytic) Partiële Oxidatie
DC	Direct Current
Dies	Diesel
DOE	Department of Energy (USA)
EtOH	Ethanol
FC	Fuel Cell
GHSV	Gas Hourly Space Velocity
H <sub>2</sub>	Waterstof
IFC	International Fuel Cells (brandstofcelfabrikant)
LHV	Lower Heating Value
LPG	Liquid petrol gas
MEA	Membrane Electrode Assembly
MeOH	Methanol
PE	Polymer Electrolyte
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles Program, U.S.
POX	Partiële Oxidatie
PSA	Pressure Swing Adsorption
SMR	Steam methane reforming, stoom reformen
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SPFC	Solid Polymer Fuel Cell, ofwel PEMFC





## APPENDIX A: BESCHRIJVING VERVOLGTRAJECT

In dit rapport is een inventarisatie gegeven van fuel processing opties, en is een globale beschrijving van deze opties gegeven. Een logische vervolgstap hierop is een studie waarin de in deze studie geselecteerde technologieën voor fuel processing beoordeeld worden op hun geschiktheid gegeven een toepassing en randvoorwaarden. De vervolgstudie heeft tot doel een gedetailleerd overzicht van de kenmerken geven van verschillende van opties voor fuel processing voor vervoerstoepassingen. De vervolgstudie moet aangeven bij welke randvoorwaarden een bepaald processchema de voorkeur heeft.

1. Gedetailleerde beschrijving en karakterisering (uitwerken literatuur)
2. Beoordeling van opties en nadere selectie. Deze fase bestaat uit de volgende stappen:
  - a) Selecteren van toepassing(en)
  - b) Vaststellen beoordelingscriteria
  - c) Waardering beoordelingscriteria, gerelateerd aan geselecteerde toepassing(en)
  - d) Scoren van de opties op de criteria
  - e) Benoemen veelbelovende opties
  - f) Combineren veelbelovende opties tot fuel processing systemen
3. Beoordeling fuel processing systemen
  - a) Vaststellen vergelijkingsbasis
    - Specifieke toepassing(en)
    - Systeemgrenzen
    - Type brandstofcel
    - Systeemvermogen
    - Etc.
  - b) Modelleren systemen
    - preliminary PFD
    - preliminary mass- en heat balances
  - c) Beoordeling systemen
    - Vaststellen rendement, volume en andere beoordelingscriteria, evt. inclusief kostenschattting
4. Evaluatie
  - a) Identificatie meest veelbelovende fuel processing systemen
  - b) Identificatie onderzoeks- en ontwikkelingsbehoefte
  - c) Identificatie kansen en bedreigingen ECN programma en terugkoppeling daarmee.

De literatuurstudie bracht een referentie [5] die een belangrijke voorzet geeft voor de invulling van enkele van de bovenstaande punten, te weten:

- een overzicht geeft van de beoordelingscriteria (2a en 3 c)
- een uitgebreide definitie levert en een vergelijkingsbasis (3a)
- een overzicht geeft van de ontwikkelingsdoelen wat betreft prijs en prestatie (2a en 3c)

Op basis van met name deze referentie is een opzet gemaakt voor de uitgangspunten en vergelijkingscriteria voor een gedetailleerde vergelijking van fuel processing opties voor vervoerstoepassingen. Deze is gegeven in Appendix B.

## APPENDIX B: UITGANGSPUNTEN EN VERGELIJKINGSCRITERIA VOOR GEDETAILEERDE VERGELIJKING

### I. Inleiding

Als startpunt voor een aanbevolen meer gedetailleerde vergelijking van fuel processing opties worden in deze bijlage de mogelijke uitgangspunten en vergelijkingscriteria gedefinieerd. De definiëring betreft specificatie van toepassing van het systeem, systeemvermogen, systeemgrenzen, brandstofcelstack en brandstoffen. Bovendien worden vergelijkingscriteria gedefinieerd en waar mogelijk worden deze gekwantificeerd als doelstellingen.

De specificaties zijn hoofdzakelijk gebaseerd op door het DOE gefinancierd onderzoek. Specifiek zijn dit een studie van ADL in 2000 [5] en een presentatie op een fuel cell R&D meeting voor het DOE vervoersprogramma van juni 2000 [7].

### II. Definitie en vergelijkingsbasis

#### B.1 Toepassing en vermogen van brandstofcelsysteem

Het brandstofcelsysteem levert elektriciteit voor de aandrijving van een personenwagen. Het vermogen op de klem van de brandstofcel, zonder aftrek van hulpvermogen, wordt op 56 kW gesteld. Dit is ook het bruto vermogen (dat is exclusief parasitair vermogen) van het brandstofcelsysteem dat beschouwd wordt in de ADL studie [5]. Het aanhouden van hetzelfde vermogen vereenvoudigt vergelijking van resultaten. De vermogens van enkele brandstofcelauto's die in ontwikkeling zijn liggen iets hoger, Tabel B1.

Tabel B1: *Enkele brandstofcelauto's in ontwikkeling, [80]*

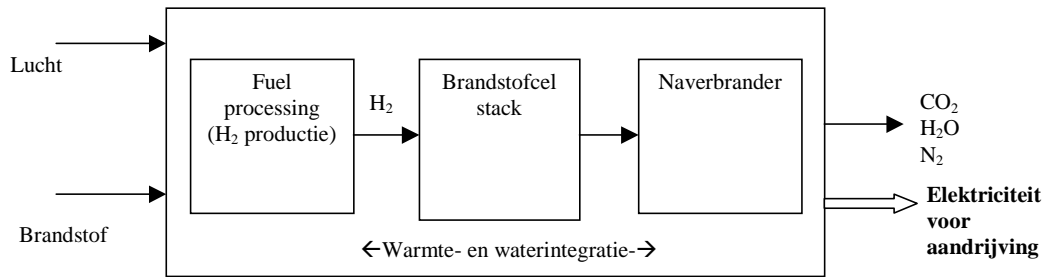
Concept	Systeem Vermogen [kW]	Brandstof	Project en Projectpartner
P2000	67	H2	Xcellsis en Ford
Necar 5	75	MeOH	Xcellsis en DaimlerChrysler
Premacy FC-EV	75	MeOH	Xcellsis en Mazda

#### B.2 Brandstoffen

Brandstof opties voor de fuel processor zijn diesel, benzine, LPG methanol en aardgas. De specificaties van de brandstoffen en de wijze waarop ze kunnen worden gemodelleerd zijn vermeld in Appendix C. De fuel processor zal worden ontworpen voor een of meerdere van deze brandstoffen. De ADL studie [5] gaat uit van een processor die wordt ontworpen voor benzine, maar die flexibel is ten opzichte van de gebruikte brandstof.

#### B.3 Systeemgrenzen

De systeemgrenzen van het brandstofcelsysteem liggen zoals geschetst in Figuur B1. Brandstof en lucht gaan het systeem in, afgas en netto elektrisch vermogen gaan het systeem uit.



Figuur B1: *Systeemgrenzen brandstofcelsysteem*

Binnen het brandstofcelsysteem worden drie sub-systemen onderscheiden:

- fuel processor subsysteem
- brandstofcel subsysteem
- balance-of-plant componenten

De individuele componenten van het systeem worden over de sub-systemen verdeeld als getoond in Tabel B2. De opsomming van componenten is niet noodzakelijk volledig; ook is niet noodzakelijkerwijs elk van de componenten aanwezig in het systeem.

Tabel B2: *Indeling van subsystemen [7]*

<i>Fuel processor sub-systeem</i>	<i>Brandstofcel sub-systeem</i>	<i>Balance-of-plant</i>
<i>Brandstof toevoer</i>	Brandstofcelstack Compressor/expander	Opstart accu System controller
<i>Reformaat Generator</i>	Naverbrander	Elektrisch Etc.
Reformer/oxidator	Sensoren en control kleppen Etc.	
Shift sectie Etc.	Bevochtiger	
<i>Reformaat conditonering</i> CO verwijdering Etc		
<i>Water toevoer</i> Water scheiders Proceswater reservoir Etc.		

Buiten het systeem vallen:

- brandstoftank
- vermogensconditionering
- elektrische motor
- electric drive train
- accu
- overig elektrisch systeem

## B.4 Brandstofcelstack en omgevingscondities

Uitgegaan wordt van een PEMFC. De uitgangspunten voor de brandstofcelstack staan in Tabel B3.

Tabel B3: *Uitgangspunten voor brandstofcelstack [5], [7]*

Item	Eenheid	
<i>Brandstofcel condities</i>		
cel voltage <sup>1)</sup>	V	0.8
Stroomdichtheid	MA/cm <sup>2</sup>	310
Vermogensdichtheid <sup>1)</sup>	MW/cm <sup>2</sup>	250
Temperatuur	°C	80
Druk	atm	3
Percentage anode luchtspui	%	1
Brandstof utilisatie	%	85
Kathode stoichiometrie		2.0
<i>Stack parameters</i>		
module voltage <sup>1)</sup>	V	300
bruto vermogen <sup>1, 2)</sup>	kW	56
aantal stacks in serie		2
stroom	A	186
actief oppervlak	cm <sup>2</sup>	600
cellen per stack		188
Koelplaten per cel		1
<i>Gassamenstelling en toleranties</i>		
CO concentratie		
na reiniging <sup>3)</sup>	ppm	10
Tolerantie brandstofcel <sup>3)</sup>	ppm	100
H2S concentratie		
na reiniging	ppm	0
Tolerantie brandstofcel	ppm	?
NH3 concentratie		
na reiniging	ppm	< 10
Tolerantie brandstofcel	ppm	13
Relatieve vochtigheid		100%

- 1) Bij een bepaalde stroom is het voltage en het vermogen mede afhankelijk van de H<sub>2</sub>-concentratie aan de ingang van de brandstofcelstack. Deze is in de ADL studie 40% (droge basis). In deze studie is de H<sub>2</sub>-concentratie afhankelijk van de fuel processing optie.
- 2) Het parasitair vermogen is in de ADL studie 6 kW; het netto vermogen 50 kW.
- 3) Er wordt veel onderzoek verricht aan CO resistente brandstofcellen. Indien de ontwikkeling van een PEM cel met een hogere CO tolerantie slaagt, dan leidt dit tot een versimpeling van de fuel processor. Het effect kan met een systeemstudie worden onderzocht.

De omgevingscondities zijn 1 atm. en 15°C. Deze condities zijn ook gebruikt in de ADL studie. De omgevingstemperatuur waarvoor het systeem wordt ontworpen heeft aanzienlijke invloed op de omvang van de warmtewisselaars in het systeem. Het systeem moet kunnen functioneren bij omgevingstemperatuur tussen -20° C en 40° C.

### III. Karakteristieken

De opties kunnen worden beoordeeld en vergeleken op basis van karakteristieken. Deze karakteristieken kunnen worden onderverdeeld in fysieke karakteristieken, prestatie karakteristieken en operationele karakteristieken. [29].

Onder *fysieke karakteristieken* vallen:

- Kwantitatieve fysieke karakteristieken:
  - Productiekosten per kW
  - Levensduur
  - Power density (kg/kW)
- Kwalitatieve fysieke karakteristieken
  - Configuratie
  - Betrouwbaarheid
  - Complexiteit

Onder *prestatie karakteristieken* vallen:

- Kwantitatieve prestatie karakteristieken:
  - Systeemefficiency (LHV) (Vollast en 25 % deellast)
  - Stack efficiency (LHV) (Vollast en 25% deellast)
  - Fuel processor efficiency (LHV)
  - Responstijd
  - Opstarttijd
  - Emissies
  - Turn down ratio<sup>1</sup>
- Kwalitatieve prestatie karakteristieken
  - Duurzaamheid

Onder *operationele* karakteristieken vallen:

- Kwalitatieve operationele karakteristieken
  - veiligheid
  - onderhoud
  - dynamisch gedrag
  - regelbaarheid

### IV. Ontwikkeldoelen

Voor een aantal van deze karakteristieken zijn gekwantificeerde doelstellingen gevonden. In de Tabellen B4 en B5 is een overzicht gegeven zoals deze worden geformuleerd door het Amerikaanse Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV). Deze doelstellingen zijn gegeven voor het jaar 2000 en voor 2004. De doelstellingen van 2004 komen overeen met de situatie waarin de brandstofcelauto klaar is voor marktintroductie. Verder is een schatting gegeven van de status van de technologie in het jaar 2000. De getallen zijn gebaseerd op door DOE gefinancierd onderzoek [5], [7].

---

<sup>1</sup> het percentage tot waar het systeemvermogen terug kan worden gebracht, waarbij goede operatie nog gegarandeerd is.

Tabel B4: *Kwantitatieve ontwikkeldoelen voor fysieke karakteristieken [5], [7]*

Criterium	eenheid	Schatting status 2000	PNGV doelen	
			Voor 2000	Voor 2004
<i>Productie kosten per kW</i> <sup>2)</sup>				
Stack systeem	<sup>3)</sup> €/ kW	177	100	40
Fuel processor				
Reformaat productie	€/ kW	40		
Reformaat conditionering	€/ kW	20		
Water toevoer	€/ kW	24		
Brandstof toevoer	€/ kW	<u>2</u>		
Totaal fuel processor	€/ kW	86	30	10
Balance of Plant	€/ kW	10		
Systeem Assemblage	€/ kW	<u>21</u>		
Totaal	€/ kW	294	130	50
<i>Levensduur</i>	uur	1000	2000	5000
<i>Power density</i>				
Brandstofcel	kg / kW	5.9	2.9	
Fuel processor	kg / kW	4.3	1.7	
Ballance of Plant	kg / kW	<u>2.2</u>		
Totaal	kg / kW	12.4	4.0	
	<sup>4)</sup> l / kW	12.4	4.0	3.3

Tabel B5: *Kwantitatieve prestatie karakteristieken [5], [7]*

Criterium	eenheid	Schatting status 2000	PNGV doelen	
			voor 2000	voor 2004
<i>Systeem efficiëntie (LHV)</i>				
Op vollast	%	37.1	? 30	? 38
Op 25% deellast <sup>5</sup>	%	34	40	48
<i>stack efficiëntie (LHV)</i>				
Op vollast	%		44	48
Op 25% deellast	%		55	60
<i>fuel processor efficiency</i>				
Op vollast	%		75	80
<i>Responstijd</i> <sup>1)</sup>				
Opstarttijd	s	360	60	30
Emissies		< Tier 2	< Tier 2	< Tier 2

1) van 10% naar 90% vermogen

Uit de tabellen B4 en B5 blijkt duidelijk dat de stand van de technologie in het jaar 2000 achterloopt op de PNGV doelstellingen. Voor de fuel processor moeten specifiek de productiekosten en de power density zeer sterk worden gereduceerd. De efficiëntie van de fuel processor ligt al dicht bij de doelstellingen. Verder moet gewerkt worden aan een verlenging van de levensduur van de fuel processor en een reductie van de opstarttijd en responstijd.

<sup>2</sup> Gehanteerde wisselkoers: €1.00 = \$ 1.00; Productievolume: 500,000 auto's per jaar

<sup>3</sup> Belading: 180 g Pt, 45 g Ru, bepaald ~ 30% van kosten stack systeem

<sup>4</sup> Uitgegaan wordt van een dichtheid van 1 kg/l

<sup>5</sup> Berekening van het deellastvermogen kan gebruik worden gemaakt van een simpele relatie uit [4].

## APPENDIX C: SPECIFICATIE BRANDSTOFFEN

Opties voor brandstoffen voor de fuel processor zijn o.a. diesel, benzine, LPG, methanol en aardgas. De specificaties van de brandstoffen zijn vermeld in Tabel C1.

Tabel C1: *Brandstof eigenschappen*

Brandstof	Modelleren als:	ref.	Eigenschappen				ref.
			Molecuul-formule	gemiddeld molgewicht	LHV	dichtheid	
Diesel	complex mengsel	[68]	$C_{12.954}H_{24.385}$	180.18	41.47	0.84	[68]
			Alternatief: $C_{16}H_{34}$	22.448			[71]
Benzine	Octaan	[31]	$C_8H_{18}$	114.23	44.52	0.70	[71]
LPG	Mengsel propaan/butaan <i>massaverhouding:</i> NL zomer 30/70 NL winter 70/30 VS 95/5	[32]	$C_{3.70}H_{9.40}$	53.92	45.94	0.58	[71]
			$C_{3.30}H_{8.60}$	48.30	46.20	0.58	
			$C_{3.05}H_{8.10}$	44.80	46.36	0.58	
Methanol	$CH_3OH$		$CH_3OH$	32.04	19.92	0.79	[72]
Aardgas	Mengsel		Groningen aardgas	18.64	38.02	drukafh.	[73]

### *Diesel*

Diesel is een complex mengsel van koolwaterstoffen bestaande uit verschillende verbindingssklassen. Voor berekeningen met een dergelijk mengsel is het zinvol een representatief mengsel te gebruiken waarin de belangrijkste verbindingssklassen vertegenwoordigd zijn, die de juiste formule-som en de juiste energiewaarde benadert [68], [30]. Het mengsel uit Tabel C2 voldoet aan deze voorwaarden. Voor diesel is in de literatuur niet (zoals wel voor benzine) een enkele component gevonden waartoe het hele mengsel ter vereenvoudiging kan worden gereduceerd.

Tabel C2: *Samenstelling representatief voor diesel [68]*

Component	Massapercentage	Component	Massapercentage
	%		%
n-nonaan	1.22	n-hexylbenzeen	0.41
n-decaan	2.43	n-heptylbenzeen	0.55
n-C <sub>11</sub>	5.17	n-octylbenzeen	0.58
n-C <sub>12</sub>	9.12	n-nonylbenzeen	0.59
n-C <sub>13</sub>	20.07	n-decylbenzeen	0.65
n-C <sub>14</sub>	19.59	n-C <sub>11</sub> -benzeen	0.30
n-C <sub>15</sub>	9.89	n-C <sub>12</sub> -benzeen	0.20
n-C <sub>16</sub>	4.90	Naftaleen	3.02
n-C <sub>17</sub>	2.45	1-methylnaftaleen	6.54
n-C <sub>18</sub>	1.22	1-ethylnaftaleen	4.53
n-C <sub>19</sub>	0.61	1-propylnaftaleen	3.22
n-C <sub>20</sub>	0.31	1-butylnaftaleen	2.15
n-pentylbenzeen	0.27		

### *Benzine*

Benzine is evenals diesel een complex mengsel van koolwaterstoffen bestaande uit verschillende verbindingklassen. Om een uniforme aanpak te vereenvoudigen wordt in het algemeen met de formulesom  $C_8H_{18}$  gewerkt [31]. De reductie van vele componenten tot octaan houdt een sterke vereenvoudiging in, maar is voor de eerste berekeningen toereikend.

### *LPG*

Liquified petroleum gas (LPG) bestaat uit een mengsel van koolwaterstoffen met als hoofdcomponenten propaan, butaan, isobutaan, propaan en buteen. Ter vereenvoudiging wordt het mengsel veelal beschreven als een mengsel van propaan en butaan [32]. De massaverhouding propaan/butaan verschilt in Nederland tussen zomer en winter en verschilt van die in de Verenigde Staten.

### *Methanol*

Methanol wordt beschreven als 100% methanol.

### *Aardgas*

Aardgas wordt gemodelleerd als Groningen aardgas [73].



APPENDIX D: CATEGORISERING VAN OPTIES

Ref	Titel	Syngas productie				Syngas omzetting	H <sub>2</sub> zuivering					Humidify problem	Varianten	Brandstoffen						opmerk.	
		SR	CPO/POX	ATR	anders		Palladium mem	Ceramic mem	Polymer mem	PSA	div.			CH4	MeOH	LPG	Benz	Dies	Eth		
[1], Rolls Royce	Solid Polymer Fuel Cell Systems Applications study to identify and prioritise R&D issues	x	x	x			x	x	x	x			recovery exhaust pressure	x	x						stationair en vervoerstoepassingen
[2], Ioannides, T.	Efficiency of a solid polymer fuel cell operating on ethanol	x	x																	x	efficiëntie analyse, geen evaluatie van opties
[3], Ioannides, T.	Thermodynamic analysis of ethanol processors for fuel cell applications	x	x																	x	
[4], Thorstensen, B.	A parametric study of fuel cell system efficiency under full and part load operation																				geen evaluatie van opties, theoretisch beschouwing
[5], ADL	Cost analysis of fuel cell system for transportation, Baseline system cost estimate			x												x	x	x			geïntegreerde ATR / HTS / LTS / ontzwaveling /stoomopwekking
[6], Davis, P.B.	Challenges for transportation fuel cells: fuel processing and cost																				
[7], Milliken, J.	Department of Energy Transportation Fuel Cell Program			x																	geen beschouwing van verschillende technologieën
[8], Krumpelt, M.	Catalytic Autothermal Reforming			x		x							Micro-channel monoliet katalysatorontwerp, ATR								
[9], Ahmed, S.	Integrated Fuel Processor Development			x		x							Alternatieve shift katalysator & geïntegreerd reactor ontwerp								
[10], Myers, D.	Alternative water-gas shift catalysts												ontwikkeling alternatieve WGS katalysator								
[11], Kopasz, J.P.	Effects of fuels/contaminants on reforming catalyst performance and durability			x																	effecten van reactanten en verontreinigingen
[12], Borup, R.	Fuel processing: fuel and fuel constituents effects on fuel processor and catalyst durability and performance			x																	effecten van reactanten
[13], Krause, T.	Sulfur removal from reformat																				ontzwaveling
[14], Inbody, M.	CO Clean-up development										PrOx		microchannel fuel processor, zeer compact								PrOx = preferential oxidation=Selox
[15], PNNL	Microchannel fuel processing	x																			
[16], Doss, E.	Transportation fuel cell systems, modeling and analysis		x																		effect van druk
[17], Zawodzinski, T.	R&D on optimized cell performance for operation on reformat and air																				100 ppm CO tolerantie bereikt
[18], Zawodzinski, C.	Efficient fuel cell systems																				innovatief systeem/stack ontwerp; niet compatibel met conventionele technologie
[19], Meyer, A.P.	Fuel cell systems development for automobiles and commercial vehicles			x																	gerealiseerde installatie (IFC)
[20], Meyer, A.P.	Progress in the development of PEM fuel cell engines for transportation			x																	gerealiseerde installatie (IFC)
[21], Gorman, M.E.	50-kilowatt ambient pressure automotive pem fuel cell and direct methanol fuel cell development																				direct methanol fuel cell
[22], Chalk, S.G.	Challenges for fuel cells in transport applications	x	x	x							PrOx										microchannel technologie
[23], Sattler, G.	Fuel cells going on-board																				all-electric schip
[24], Dudfield, C.D.	A compact CO selective oxidation reactor for solid polymer fuel cell powered vehicle application										PrOx										
[25], Han, J.	Purifier-integrated methanol reformer for fuel cell vehicles	x														x					
[26], Cunha, J.	Modelling the integration of a compact plate steam reformer in a fuel cell system	x											integratie van plate steam reformer in PEMsysteem								bepert tot modellering
[27], Hacker, V.	Hydrogen production by steam-iron process				steam-iron																grootschalig stationair, niet voor vervoerstoepassingen
[28], Rampe, T.	Hydrogen generation from biogenic and fossil fuels by autothermal reforming			x													x				honingraat katalysator
[29], CJB Developments	Feasibility of using gasoline type fuels in mobile spfc systems	x	x	x													x	x	x		goede beschrijving opties
[30], Menzer, R.	Verfahrensanalyse von Brennstoffzellensystemen zur Stromerzeugung für Elektroantriebe in Fahrzeugen bei Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffe	x		x												x, DME	x	x	x	x	
[31], Menzer, R.	Analyse von Energieumwandlungssystemen für Fahrzeuge mit Brennstoffzellen: Methanol und Benzin als Energieträger																				
[32], Stoffele, R.	Evaluatie van een kleinschalig fuel processing systeem	x	x	x																	
[33], Recupero, V.	Development of a compact clean-up reactor based on the										PrOx										katalysator ontwikkeling

Ref	Titel	Syngas productie				Syngas omzetting	H <sub>2</sub> zuivering					Humidify problem	Varianten	Brandstoffen						opmerk.						
		SR	CPO/POX	ATR	anders		Palladium mem	Ceramic mem	Polymer mem	PSA	div.			CH4	MeOH	LPG	Benz	Dies	Eth							
	selective oxidation of CO																									
[34], Adjemian, K.T.	Composite membranes for high temperature operation of proton-exchange membrane fuel cells																									hoge temperatuur PEM materialen (120°C); systeemconsequenties niet vermeld
[35], Dubose, R.	Improve fuel cell thermal efficiency with desiccant humidifiers																									desiccant wheel humidifier
[36], Wiartalla, A.	Compressor expander units for fuel cell systems	x																x								volledige systeemanalyse, operatie op meerdere drukniveau's m.b.v. compressoren en expanders
[37], An, S.	Comparison and development of Pt-membranes reformed by two kinds of methods for self-humidifying PEM fuel cell																									ontwikkeling van membraan dat opereert zonder externe bevochtiging
[38], Heinzel, A.	Reforming of fossil fuels - R&D at Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems	x		x														x		x				x		SR: aardgas, MeOH; ATR: LPG, benzine
[39], Cross, J.	Fuel Cell Power System Technology																									algemeen informatief verhaal van Nuvera (=Epyx + De Nora)
[40], Inbody M.	Los Alamos Fuel Cell Research: Focus on PEMFC fuel composition effects, transient CO control and stack testing																									Selox katalysator and reforming katalysator
[41], Schmall, D.	Polymer fuel cell system design for all electric naval ships																									All Electric Ship (AES), geen evaluatie opties
[42], Kumar, R.	Performance requirements for a gasoline-fueled automotive fuel cell system to meet the PNGV target of 80 miles per gallon				x																					drive cycle analysis, geen evaluatie opties
[43], Amphlett, J.	PEM fuel cell hydrogen production by methanol-steam reforming: the effect of catalyst deactivation	x																	x							katalysator deactivatie
[44], Meyers, D.	Reducing the volume/weight of the fuel post processor for PEFC power systems																									WGS, PrOx, S-removal catalysts
[45], Kopasz, D.	Effects of gasoline components on fuel processing and implications for fuel cell fuels				x																					geen evaluatie opties; effect van verontreiniging (S) op degradatie en van componenten en GHSV op conversie
[46], Borup, R.	Fuels and fuel impurity effects and fuel processing catalysts				x																					~ als hierboven
[47], McDermott, S.	Results of fuel processor lifetime testing																									bevat geen gedetailleerde info
[48], Swartz, S.	Nanoscale water-gas-shift catalysts																									Pt-gebaseerd ipv Cu gebaseerde katalysator
[49], Palm, C.	Catalyst for diesel reforming	x																								enkele condities worden genoemd; verder geen evaluatie van opties
[50], Peters, R.	Kinetics of methane steam reforming	x																								methaan als voeding; niet voor vervoerstoepassingen
[51], Wieland, S.	new catalysts for autothermal reforming of gasoline and water gas shift reaction				x																					goede beschrijving condities
[52], Roes, J.	cracking of hydrocarbons to produce hydrogen for PEM fuel cells																									CnHm --> n C + m/2 H2, voordeel: goedkope fuel processor, 400-500 US\$, nadeel: lage efficiëntie, niet voor mobiel
[53], Okada, O.	Development of advanced reforming system for PEMFC																									huishoudelijke (stationaire) toepassing
[54], Lindstrom, B.	steam reforming of methanol for automotive applications	x																								catalysator for SR en shift
[55], Bloomfield, D.	hydrocarbon fuel processing for fuel cell power plants	x	x	x																						vergelijking van POX, ATR en SR
[56], Hacker, V.	The steam-iron process for gas reforming and hydrogen generation																									niet geschikt voor mobiele toepassing
[57], Chen, E.	Simulating the performance fo a selective oxidation reactor for carbon monoxide removal																									monolite supported selox catalyst
[58], He, L.	Performance influence of catalyst supports in a transportation fuel processor																									invloed van katalysatordrager
[59], Nakagawa, T.	Development of PEFC in Fuji Electric																									geen informatie over fuel processing
[60], Maeda, H.	Development of 10kW class PEFC module																									geen informatie over fuel processing, enkel stack
[61], Tourbier, D.	Automotive pem fuel cell system development at honeywell																									geen informatie over fuel processing
[62], Take, T.	Cu-Zn/Al2O3/Al-plate catalyst for a methanol reformer	x																								plate reformer
[63], Dams, R.	Compact, fast response methanol fuel processing systems for PEMFC ...	x																								Europees project
[64], Mauzey, J.	Automotive fuel processor				x																					prestaties van een prototype
[65], Docter, A.	Reformer for gasoline and gasoline like fuels				x																					compacte autothermal reformer; geen beschrijving systeem
[66], Krumpelt, M.	Catalytic autothermal reforming for fuel cell systems				x																					ATR katalysator
[67], Cooper, J.	Direct electrochemical conversion of carbon: systems for efficiënt conversion of fossil fuels to electricity																									niet voor mobiele toepassing; laag rendement
[68], Amphlett, J.C	Simulation of a 250 kW diesel fuel processor/PEM fuel cell system																									